

**ВИХРЕВЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ ЛИНЗЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВИХРЕВЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ***Р.В. Скиданов, С.В. Ганчевская**Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,  
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия***Аннотация**

Рассмотрено формирование вихревых световых пучков с помощью вихревой параболической линзы. Показано, что при формировании такого пучка складываются топологические заряды структуры вихревой линзы и топологические заряды отдельных зон вихревой линзы.

**Ключевые слова:** вихревой световой пучок, вихревая линза, топологический заряд.

**Цитирование:** Скиданов, Р.В. Вихревые дифракционные линзы для формирования вихревых световых пучков / Р.В. Скиданов, С.В. Ганчевская // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 5. – С. 674-677. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-674-677.

**Введение**

Вихревые световые пучки известны довольно давно [1, 2].

Вихревые пучки могут быть сформированы с помощью специальных решёток [2, 3, 7] или с помощью спиральной фазовой пластины [5]. Можно также использовать вихревую зонную пластинку [8]. Также есть работы, в которых вихревые световые пучки формируют с использованием деформируемого сегментного зеркала [12] или за счёт использования плазмонных эффектов [14].

Можно формировать вихревые световые пучки с помощью резонатора лазера, внутри которого расположена спиральная фазовая пластина [8]. Такие пучки также формируются из пучков Гаусса–Эрмита с помощью преобразователя, состоящего из сферической и цилиндрической линзы [4, 5]. Наличие у таких пучков орбитального углового момента определяет их основное использование для оптического вращения микрообъектов [9], оптической передачи информации [13].

Вихревыми также являются пучки Бесселя и Гаусса–Лагерра [6, 11]. В [11] было рассмотрено формирование пучков Бесселя вихревыми аксиконами. При этом было показано, что топологические заряды структуры таких аксиконов и топологические заряды зон складываются, что даёт возможность формирования пучка Бесселя заданного порядка практически бесконечным количеством фазовых дифракционных оптических элементов. В данной работе представлен способ формирования простых вихревых пучков за счёт использования нового типа дифракционных оптических элементов – вихревых линз, подобных представленным в [8], но с добавленными топологическими зарядами зон, как у вихревых аксиконов в [11].

**1. Вихревая линза**

В [11] описываются дифракционные оптические элементы нового типа, которые имеют функции пропускания вида

$$\tau(r, \varphi) = \frac{1}{2} [\exp(im_1\varphi) + \exp(im_2\varphi)] + \frac{1}{2} [\exp(im_2\varphi) - \exp(im_1\varphi)] \operatorname{sgn} [\cos(2\pi\nu r + n\varphi)], \quad (1)$$

где  $m_1, m_2$  – номера дополнительных вихревых составляющих,  $r, \varphi$  – полярные координаты,  $\nu$  – пространственная несущая частота,  $n$  – топологический заряд бинарного дифракционного аксикона, который является основой структуры этого ДОЭ. В настоящей работе будем рассматривать элементы, у которых  $m_1 = m_2 = m$ , но при этом существует дополнительный поворот на  $\pi/m$  для разделения зон. Такие элементы, как было показано в [11], формируют пучки Бесселя. В настоящей работе мы рассмотрим похожий элемент, у которого в формуле появляется квадратичная зависимость от  $r$ . Таким образом, формула (1) преобразуется для таких элементов в

$$\tau(r, \varphi) = e^{im\varphi} \cdot \operatorname{sgn} \left[ \cos \left( \frac{k}{f} r^2 + n\varphi \right) \right], \quad (2)$$

где  $f$  – фокусное расстояние вихревой линзы, которая является основой структуры этого ДОЭ. Будем в дальнейшем называть такой элемент вихревой линзой. Точно так же, как в [11], с помощью разных сочетаний топологических зарядов структуры и зон рассчитывалась фазовая функция бесконечного количества элементов, каждый из которых формирует пучок Бесселя заданного порядка, этот элемент в своей фокальной плоскости будет формировать вихревой световой пучок заданного порядка, при этом таких фазовых функций можно сформировать также практически бесконечное количество.

На рис. 1 представлен характерный вид такой вихревой линзы.

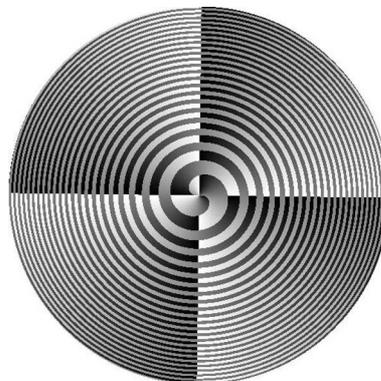


Рис. 1. Характерный вид вихревой линзы: топологический заряд структуры  $n = 1$ , топологический заряд зон  $m = 2$ ,  $f = 270$  мм

### 2. Формирование вихревых световых пучков

Моделирование дифракции на вихревых линзах осуществлялось с помощью преобразования Френеля. На рис. 2 представлен ряд изображений вихревых линз с разными сочетаниями топологических зарядов структуры зон (рис. 2а, г, ж, к), а также распределений интенсивностей (рис. 2б, д, з, л), сформированных на расстоянии 270 мм. Все представленные элементы формируют вихревой световой пучок 1-го порядка.

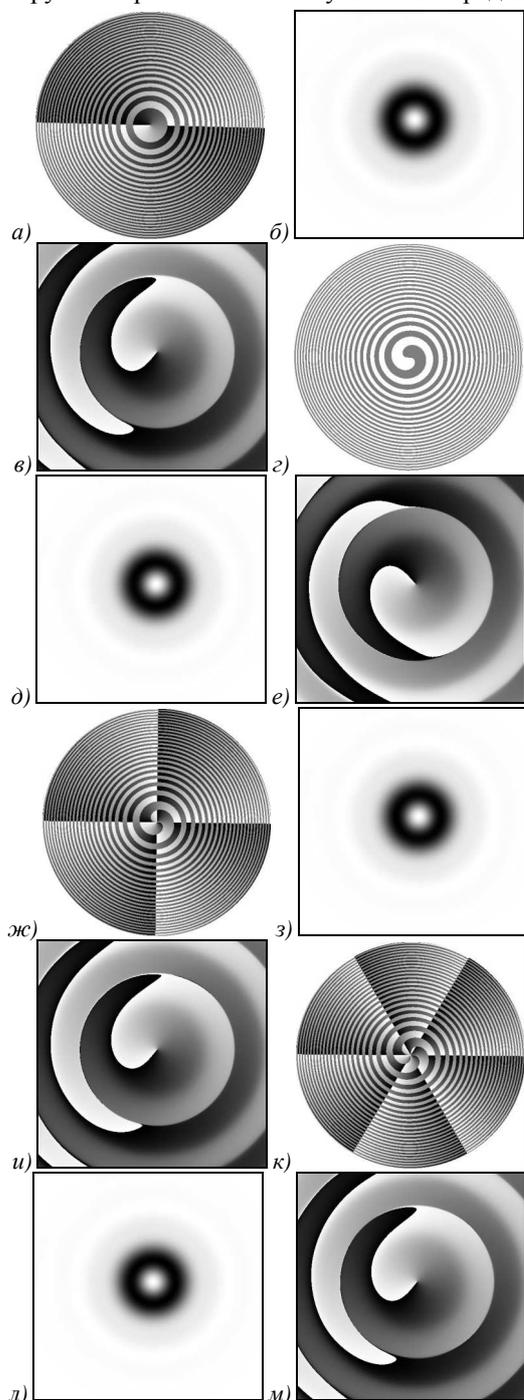


Рис. 2. Фазовые функции вихревых линз с топологическими зарядами структуры и зон  $(n, m)$  соответственно  $(0, 1)$  (а),  $(1, 0)$  (г),  $(-1, 2)$  (ж),  $(-2, 3)$  (к), а также формируемые ДОЭ с этими фазовыми функциями распределения интенсивности на расстоянии 270 мм (б, д, з, л) и фазы (в, е, и, м)

Как видно из рис. 2, совершенно разные по фазовой функции ДОЭ формируют одинаковые вихревые световые пучки с единичным топологическим зарядом (рис. 2в, е, и, м). При этом на рис. 2 следует отметить два вырожденных случая вихревых линз. При нулевом заряде зон (рис. 2г) мы получаем бинарную фазовую линзу, описанную в [10], а при нулевом заряде структуры (рис. 2ж) получается обычная параболическая линза, в каждой зоне которой добавлен топологический заряд.

Точно так же можно показать, что очень похожие друг на друга по фазовой функции ДОЭ могут формировать вихревые световые пучки с кардинально отличающимися топологическими зарядами (рис. 3).

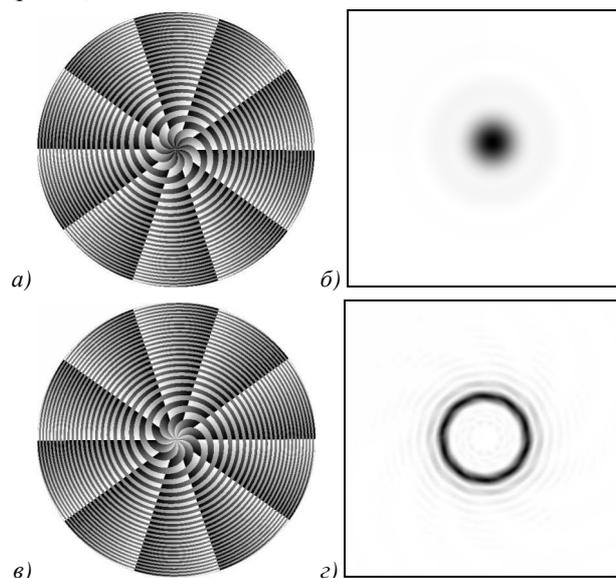


Рис. 3. Фазовые функции вихревых линз с топологическими зарядами структуры и зон соответственно  $(-5, 5)$  (а),  $(-5, -5)$  (в), а также формируемые ДОЭ с представленными фазовыми функциями распределения интенсивности на расстоянии 270 мм (б, г)

Как видно из рис. 3, весьма похожие по структуре ДОЭ формируют пучок, похожий на Гауссов (топологический заряд = 0), и вихревой световой пучок с топологическим зарядом -10. Таким образом, представленные ДОЭ позволяют формировать любой вихревой пучок бесконечным количеством способов, что особенно удобно для формирования суперпозиций вихревых световых пучков (рис. 4). На рис. 4 представлены бинарные фазовые функции таких ДОЭ с  $f=270$  мм, полученные путём линейного кодирования исходных фазовых функций.

Как видно из рис. 4, закодированные бинарные элементы, формирующие одинаковые вихревые пучки, имеют сильно отличающиеся друг от друга фазовые функции. Следует заметить, что одинаковые пучки получаются в этом случае только в одном порядке, т.к. в другом порядке меняется знак операции, т.е. вместо сложения получается вычитание. Для элемента на рис. 4в это важно, т.к. оба топологических заряда отличны от 0.

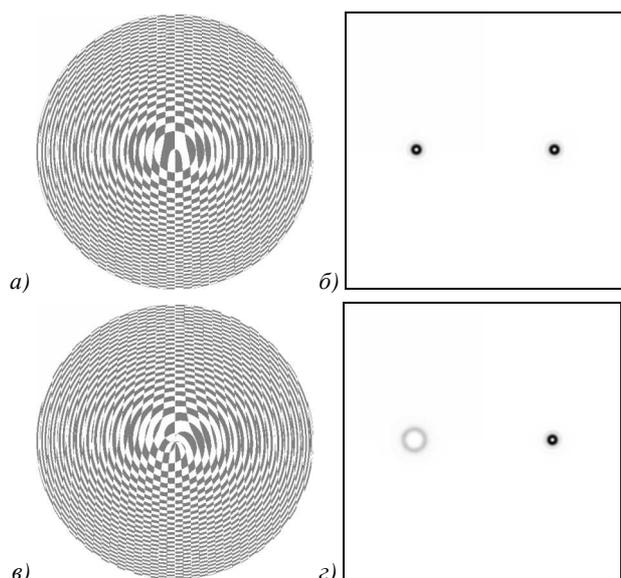


Рис. 4. Фазовые функции вихревых линз с топологическими зарядами структуры и зон соответственно  $(0, 1)$  (а),  $(-2, 3)$  (в), кодированные линейно, и распределения интенсивности на расстоянии 270 мм (б, г)

### Заключение

Описан новый вид дифракционных оптических элементов, которые за счёт использования топологических зарядов структуры и топологических зарядов зон позволяют бесконечным количеством способов формировать оптические вихри заданного порядка в зоне дифракции Френеля.

### Благодарности

Работа выполнена за счёт Российского научного фонда (грант 14-19-00114).

### Литература

1. **Khonina, S.N.** The phase rotor filter / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, M.V. Shinkaryev, V.A. Soifer, G.V. Uspleniev // *Journal of Modern Optics*. – 1992. – Vol. 39, Issue 5. – P. 1147-1154. – DOI:10.1080/09500349214551151.
2. **Abramochkin, E.** Generation of spiral-type laser beams / E. Abramochkin, N. Losevsky, V. Volostnikov // *Optics Communications*. – 1997. – Vol. 141, Issues 1-2. – P. 59-64. – DOI:10.1016/S0030-4018(97)00215-0.
3. **Oron, R.** Efficient formation of pure helical laser beams / R. Oron, N. Davidson, A.A. Friesem, E. Hasman // *Optics Communications*. – 2000. – Vol. 182. – P. 205-208.
4. **Abramochkin, E.** Beam transformations and nontransformed beams / E. Abramochkin, V. Volostnikov // *Optics Communications*. – 1991. – Vol. 83, Issues 1-2. – P. 123-135. – DOI:10.1016/0030-4018(91)90534-K.
5. **Beijersbergen, M.W.** Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum / M.W. Beijersbergen, L. Allen, H.E.L.O. van der Veen, J.P. Woerdman // *Optics Communications*. – 1993. – Vol. 96. – P. 123-132.
6. **Allen, L.** Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes / L. Allen, M.W. Beijersbergen, R.J.C. Spreeuw, J.P. Woerdman // *Physical Review A*. – 1992. – Vol. 45. – P. 8185-8189.
7. **Bazhenov, V.Y.** Screw dislocations in light wavefronts / V.Y. Bazhenov, M.S. Soskin, M.V. Vasnetsov // *Journal of Modern Optics*. – 1992. – Vol. 39. – P. 985-990.

8. **Heckenberg, N.R.** Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms / N.R. Heckenberg, R. McDuff, C.P. Smith, A.G. White // *Optics Letters*. – 1992. – Vol. 17. – P. 221-223.
9. **Padgett, M.J.** The angular momentum of light: optical spanners and the rotational frequency shift / M.J. Padgett, L. Allen // *Optical and Quantum Electronics*. – 1999. – Vol. 31. – P. 1-12.
10. **Скиданов, Р.В.** Дифракционные оптические элементы для формирования комбинаций вихревых пучков в задаче манипулирования микрообъектами / Р.В. Скиданов, С.В. Ганчевская // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 65-71.
11. **Скиданов, Р.В.** Формирование пучков Бесселя вихревыми аксиконами / Р.В. Скиданов, С.В. Ганчевская // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 463-468.
12. **Tyson, R.K.** Generation of an optical vortex with a segmented deformable mirror / R.K. Tyson, M. Scipioni, J. Viegas // *Applied Optics*. – 2008. – Vol. 47(33). – P. 6300-6306.
13. **Gibson, G.** Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum / G. Gibson, J. Courtial, M. Padgett, M. Vasnetsov, V. Pas'ko, S. Barnett, S. Franke-Arnold // *Optics Express*. – 2004. – Vol. 12. – P. 5448-5456.
14. **Genevet, P.** Ultra-thin plasmonic optical vortex plate based on phase discontinuities / P. Genevet, N. Yu, F. Aieta, J. Lin, M.A. Kats, R. Blanchard, M.O. Scully, Z. Gaburro, F. Capasso // *Applied Physics Letters*. – 2012. – Vol. 100. – P. 013101-1.

### References

- [1] Khonina SN, Kotlyar VV, Shinkaryev MV, Soifer VA, Uspleniev GV. The phase rotor filter. *J Mod Opt* 1992; 39(5): 1147-54. DOI:10.1080/09500349214551151.
- [2] Abramochkin E, Losevsky N, Volostnikov V. Generation of spiral-type laser beams. *Opt Commun* 1997; 141(1-2): 59-64. DOI:10.1016/S0030-4018(97)00215-0.
- [3] Oron R, Davidson N, Friesem AA, Hasman T. Efficient formation of pure helical laser beams. *Opt Commun* 2000; 182: 205-208.
- [4] Abramochkin E, Volostnikov V. Beam transformations and nontransformed beams. *Opt Commun* 1991; 83(1-2): 123-35. DOI:10.1016/0030-4018(91)90534-K.
- [5] Beijersbergen MW, Allen L, van der Veen HELO, Woerdman JP. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum. *Opt Commun* 1993; 96: 123-32.
- [6] Allen L, Beijersbergen MW, Spreeuw RJC, Woerdman JP. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes. *Phys Rev A* 1992; 45: 8185-9.
- [7] Bazhenov VY, Soskin MS, Vasnetsov MV. Screw dislocations in light wavefronts. *J Mod Opt* 1992; 39: 985-90.
- [8] Heckenberg NR, McDuff R, Smith CP, White AG. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms. *Opt Lett* 1992; 17: 221-3.
- [9] Padgett MJ, Allen L. The angular momentum of light: optical spanners and the rotational frequency shift. *Optical and Quantum Electronics* 1999; 31: 1-12.
- [10] Skidanov RV, Ganchevskaya SV. Diffractive optical elements for the formation of combinations of vortex beams in the problem manipulation of microobjects. *Computer Optics* 2014; 38(1): 65-71.
- [11] Skidanov RV, Ganchevskaya SV. Formation of Bessel beams by vortex axicon. *Computer Optics* 2014; 38(3): 463-8.
- [12] Tyson RK, Scipioni M, Viegas J. Generation of an optical vortex with a segmented deformable mirror. *Applied Optics* 2008; 47(33): 6300-6.

- [13] Gibson G, Courtial J, Padgett M, Vasnetsov M, Pas'ko V, Barnett S, Franke-Arnold S. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum. *Opt Express* 2004; 12: 5448-56.
- [14] Genevet P, Yu N, Aieta F, Lin J, Kats MA, Blanchard R, Scully MO, Gaburro Z, Capasso F. Ultra-thin plasmonic optical vortex plate based on phase. *Applied Physics Letters* 2012; 100: 013101-1.

---

## DIFFRACTIVE VORTEX LENSES FOR FORMING VORTEX LIGHT BEAMS

R.V. Skidanov<sup>1,2</sup>, S.V. Ganchevskaya<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Image Processing Systems Institute,

Russian Academy of Sciences, Samara, Russia,

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University, Samara, Russia

### Abstract

Generation of vortex laser beams by use of a parabolic vortex lens is discussed. We show that when generating such beams, topological charges of the vortex lens structure and those of the lens individual zones are summed up.

**Keywords:** vortex light beam, vortex lens, topological charge.

**Citation:** Skidanov RV, Ganchevskaya SV. Diffractive vortex lenses for forming light vortex beams. *Computer Optics* 2015; 39(5): 674-7. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-674-677.

**Acknowledgements:** This work was financially supported by the Russian Scientific Foundation (grant 14-19-00114).

---

### Сведения об авторах

**Скиданов Роман Васильевич**, 1973 года рождения. В 1990 году с отличием окончил Самарский государственный университет (СамГУ) по специальности «Физика». Доктор физико-математических наук (2007 год), работает заведующим лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Р.В. Скиданов – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Р.В. Скиданова 120 статей, 7 монографий.

E-mail: [romans@smr.ru](mailto:romans@smr.ru).

**Roman Vasilevich Skidanov** (b. 1973). Graduated with honors (1990) from Samara State University (SSU), majoring in Physic. He received his Doctor in Physics & Maths (2007) degree from Samara State Aerospace University. He is the head of Micro- and Nanotechnologies laboratory at Samara Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS), holding a part-time position of a professor at SSAU's Technical Cybernetics sub-department. He is a co-author of 120 scientific papers, 7 monographs. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics.

**Ганчевская София Владиславовна**, 1992 года рождения, в 2015 получила степень магистра в СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». Автор четырёх научных статей. Область научных интересов: дифракционная оптика.

E-mail: [sofi@smr.ru](mailto:sofi@smr.ru).

**Sofiya Vladislavovna Ganchevskaya** (b. 1992). She received her Bachelor's degree in Applied Mathematics and Physic (2013) from SSAU. She is the author of 4 scientific papers. Her research interests are currently in diffractive optics.

---

Поступила в редакцию 3 ноября 2015 г.  
Окончательный вариант – 23 ноября 2015 г.